

## نوع مقاله: پژوهشی

## مدل سازی عددی اثر هم جواری بر پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی همگن

نیلوفر باباآدم (نویسنده مسئول)

دانش آموخته دکتری زمین‌شناسی، گروه زمین‌شناسی مهندسی،  
دانشکده علوم پایه، تربیت مدرس، تهران، ایران،  
niloufar.babaadam@gmail.com

علی ارومیه‌ای

استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، تربیت مدرس،  
تهران، ایران

عبدالله سهرابی بیدار

دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران،  
ایران

ابراهیم حق‌شناس

دانشیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی  
زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

شهرام مقامی

دانش آموخته دکتری زمین‌شناسی، تحلیلگر داده  
Campus Numerique in the Alps گرنوبل، فرانسه

## چکیده

در طول دهه‌های گذشته محققین بسیاری به مطالعه‌ی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی با استفاده از روش‌های مختلفی پرداخته‌اند. اثرات توپوگرافی از جمله اثرات ساختگاهی به حساب می‌آیند که سبب تشدید در امواج لرزه‌ای می‌شوند. بیشتر مطالعات انجام شده بر روی عوارض توپوگرافی محدود می‌شود به یک عارضه منفرد در حالی که آنچه در طبیعت شاهد آن هستیم از پیچیدگی‌های بیشتری برخوردار است. هدف این مقاله بررسی پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی هم‌جوار است که به همین منظور از پنج تپه نیم‌سینوسی همگن با نسبت شکل ۱ و تحت موج مهاجم ریکر SV استفاده شده است. مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از روش اجزای مرزی و کد هیبرید و به صورت دوبعدی انجام شده است که نتایج به دست آمده در حوزه زمان و حوزه فرکانس به خوبی نشان‌دهنده افزایش دامنه موج پاسخ در نمودارهای حوزه زمان و همچنین افزایش نسبت بزرگنمایی طیفی تپه‌های هم‌جوار نسبت به تپه منفرد در حوزه فرکانس می‌باشند. همچنین اشاره مختصری نیز به تأثیر زاویه موج مهاجم و تأثیر آن بر اثر هم‌جواری شده است که به همین منظور پاسخ لرزه‌ای تپه‌های هم‌جوار در دو زاویه موج مهم قائم و مایل مورد مقایسه قرار گرفته است.

**واژگان کلیدی:** اثرات توپوگرافی، اثر هم‌جواری، تپه‌های نیم‌سینوسی، مدل‌سازی دوبعدی، اجزای مرزی، هیبرید.

## ۱- مقدمه

Mohamamdi & Asimaki, 2015; Panji & Mojtazadeh-Hasanlouei, 2020; Reinoso et al., 1996) در این زمینه مطالعات عددی و تجربی بسیاری انجام شده است که هر یک به نحوی مزایا و معایبی را دارند. مطالعات تجربی معمولاً با ثبت زلزله‌ها، پس لرزه‌ها و یا خردلرزه‌ها انجام می‌شود که در نتایج تحلیل‌های به دست آمده جداسازی اثرات توپوگرافی و زمین‌شناسی در آنها به دلیل فقدان داده‌های ژئوتکنیکی یا زمین‌شناسی دشوار است. در مطالعات عددی امکان بررسی پارامتری فراهم است که می‌توان تأثیر عوامل مختلف را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد. مروری بر ادبیات فنی در این زمینه نشان می‌دهد، در دهه‌های اخیر روش‌های عددی به عنوان ابزاری مناسب برای بررسی

یکی از راه‌های به حداقل رساندن خسارات ناشی از زلزله ساخت عوامل مؤثر بر افزایش یا کاهش اثرات ناشی از امواج لرزه‌ای است که در دهه‌های اخیر پژوهشگران بسیاری در این زمینه به تحقیق پرداخته‌اند. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر امواج لرزه‌ای اثرات ساختگاهی است که به چند زیرمجموعه مختلف تقسیم می‌شود. اثرات توپوگرافی، از جمله اثرات ساختگاهی است که به‌ویژه بعد زلزله نورث‌ریج محققین بسیاری متوجه تأثیرات آن شدند. اثر عوارض سطحی بر حرکات زمین که به عنوان اثر توپوگرافی شناخته می‌شود، با استفاده از روش‌های مختلفی که در چند دهه اخیر ظهور کرده است مورد مطالعه قرار گرفته است (Babaadam et al., 2021; Fichtner, 2014; Géli et al., 1988; Kamalian, et al., 2006; Lee et al., 2009;

لرزه‌ای عوارض توپوگرافی با استفاده از روش اجزای مرزی انجام داده‌اند (Kamalian, et al., 2007; Kamalian, et al., 2007; Kamalian & Sohrabi-bidar, 2006; Khandan et al., 2011; Razmkhah et al., 2008). در یکی از این پژوهش‌ها پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی متقارن با نسبت شکل‌های متفاوت تحت موج مهاجم P و Sv مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارائه شده در این پژوهش صرفاً به بررسی پاسخ در تاج تپه پرداخته است و گویای این مطلب است که با افزایش نسبت شکل بزرگنمایی در بالای تپه نیز افزایش می‌یابد (Kamalian, et al., 2007).

علی‌الهی و همکاران (Alielahi, Kamalian, et al., 2016; Alielahi et al., 2018) نیز مجموعه مطالعات کاملی را در خصوص برهم‌کنش پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی و حفره‌های زیرسطحی تحت امواج قائم Sv و P با استفاده از روش اجزای مرزی انجام داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که وجود حفره تأثیر قابل توجهی را بر پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی می‌گذارد و میزان تأثیر آن به پارامترهای مختلفی از جمله عمق حفره وابسته است. با و همکاران (Ba et al., 2021) نیز با استفاده از روش اجزای مرزی غیر مستقیم (IBEM) به حل پاسخ لرزه‌ای تپه‌های سه‌بعدی در نیم فضای لایه‌ای تحت موج P و Sv پرداختند.

در مطالعه‌ای که توسط آنگرینی (Anggraeni, 2010) در بررسی تأثیرات عوارض توپوگرافی بر انتشار امواج انجام شد، مدل‌سازی‌ها با استفاده از (SEM) SPEC3D و برای زلزله ۲۰۰۵ کشمیر انجام شده است. نتایج در دو حالت حضور و عدم حضور عوارض توپوگرافی مورد بررسی قرار گرفته است و بیان می‌کنند که عوارض توپوگرافی با پراکنده ساختن امواج لرزه‌ای سبب تشدید در برخی از پشته‌های تپه می‌شوند. پنجی و همکاران (Panji & Mojtabazadeh Hasanlouei, 2021) نیز با ارائه روش اجزای مرزی توسعه یافته‌ای به تحلیل مسائل دوبعدی گسترش موج لرزه‌ای در محیط‌های همگن و همسانگرد دارای رفتار الاستیک خطی پرداخته‌اند.

در بسیاری از مطالعات عددی به دلیل ساده‌سازی مدل‌ها،

اثرات ساختگاهی مطرح شده‌اند و تاکنون کارایی روش‌های مختلف در این زمینه مورد ارزیابی قرار گرفته است مانند بررسی اثرات ساختگاهی در پایداری شیب‌ها (Bouckovalas & Papadimitriou, 2005; Bourdeau & Havenith, 2008; Janku et al., 2016)، تأثیر حوضه‌های رسوبی (Maghami et al., 2021, 2022; Panji et al., 2017; Sánchez-Sesma et al., 1988) و عوارض توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای (Babaadam et al., 2021, 2023; M. Panji et al., 2014; Sohrabi-bidar & Kamalian, 2013). مطالعاتی که در زمینه‌ی بررسی تأثیر عوارض توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای انجام شده است به‌طور کلی بیان‌کننده این مطلب است که در بالای تپه‌ها بزرگنمایی و در کف دره‌ها کوچک‌نمایی در موج لرزه‌ای دیده می‌شود. زمانی که نسبت شکل عارضه توپوگرافی تغییر می‌کند پاسخ امواج نیز متفاوت می‌شود؛ به گونه‌ای که با افزایش نسبت شکل میزان بزرگنمایی و کوچک‌نمایی افزایش می‌یابد (Amelsakhi et al., 2014; Babaadam et al., 2021; Geli et al., 1988; Kamalian et al., 2007; Maghoul et al., 2015; Meunier et al., 2008).

جلی و همکاران (Geli et al., 1988) از جمله افرادی بودند که به بررسی پاسخ لرزه‌ای تپه‌های دوبعدی تحت موج مهاجم SH پرداخته‌اند. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه بیان می‌کند که: الف) بررسی تأثیر توپوگرافی به تنهایی کار بسیار دشواری است زیرا همواره با فاکتورهای دیگری از جمله لایه‌بندی سطحی همراه می‌باشد، بنابراین برای بررسی بزرگنمایی در بالای عوارض توپوگرافی پیچیده نمی‌توان فقط از تخمین بر اساس فاکتور توپوگرافی استفاده کرد. ب) نسبت بزرگنمایی به‌دست آمده تاج/پای تپه در منطقه معمولاً با ساختار دوبعدی که تحت موج مهاجم SH بررسی می‌شوند مطابقت ندارند.

پس از آن سانچزسما و همکاران (Sánchez-Sesma et al., 1991) در مطالعه‌ای به معرفی روشی برای محاسبه انکسار امواج P، Sv و Rیلی توسط عوارض توپوگرافی در نیم‌فضای الاستیک پرداختند. سایر محققین نیز مطالعات گسترده‌ای را بر روی پاسخ

توپوگرافی در طبیعت هستند و این امر در کاربردی کردن نتایج مطالعات بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی‌های عددی از روش اجزای مرزی و کد HYBRID استفاده شده است. در بخش نخست ابتدا رفتار لرزه‌ای یک تپه نیم‌سینوسی با نسبت شکل (۱) مورد مطالعه قرار گرفته است و سپس برای بررسی تأثیر هم‌جواری تعداد تپه‌ها تا پنج افزایش می‌یابد. رفتار تپه‌ها در سه مدل M1، M3 و M5 و برای دو گروه از ایستگاه‌های واقع بر تاج و پاشنه تپه‌ها در حوزه زمان و حوزه فرکانس با یکدیگر مقایسه شده است.

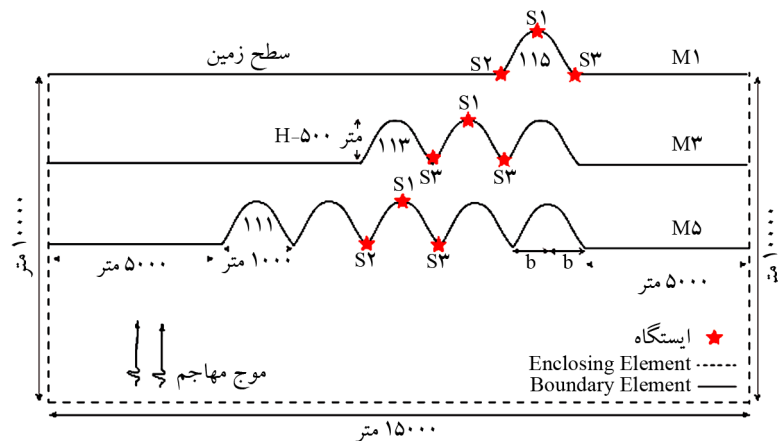
در بخش پایانی نیز به بررسی تأثیر زاویه موج مهاجم بر اثر هم‌جواری و پاسخ لرزه‌ای عوارض هم‌جوار پرداخته شده است. در این راستا از موج مهاجم در دو حالت قائم و مایل برای مدل‌سازی‌های عددی استفاده شده است و نتایج به‌دست آمده از آنها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. ضرورت مطالعه‌ی عوارض هم‌جوار نیز از آن جهت است که بتوان نتایج به‌دست آمده از مطالعات عددی را تا حد امکان به نتایج به‌دست آمده از محیط‌های طبیعی و برداشت‌های صحرائی نزدیک‌تر کرد.

## ۲- متدولوژی

هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر هم‌جواری تپه‌های نیم‌سینوسی بر پاسخ لرزه‌ای است. در میان تحقیقات انجام شده تعداد

پاسخ‌های لرزه‌ای در یک عارضه به‌خصوص مورد مطالعه قرار می‌گیرد و پژوهش‌های اندکی هستند که به مبحث مجاورت و تأثیر آن بر پاسخ لرزه‌ای توجه داشته‌اند. در این بین کامالیان و همکاران (Kamalian et al., 2012) با استفاده از روش اجزای مرزی در فضای زمان، رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب دوگانه همسان و ناهمسان را در برابر موج مهاجم قائم مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که حضور تپه‌ای کوچک‌تر در کنار یک تپه اثر قابل‌وجهی بر پتانسیل و بیشینه بزرگنمایی تاج و کناره تپه مرجع بر جای نمی‌گذارد. در حالی که حضور تپه‌ای بزرگ‌تر پتانسیل و بیشینه بزرگنمایی تاج و کناره تپه مرجع را متأثر می‌سازد. کومار و همکاران (Kumar et al., 2018) و افزالی‌راد و همکاران (Afzalirad et al., 2019) نیز تأثیر تپه‌های چندگانه بر تقویت امواج لرزه‌ای را بررسی کرده‌اند. نتایج ارائه شده بیان می‌کند که بالای (تاج) تپه‌های همگن مجاور با نسبت شکل مشابه در مقایسه با تاج تپه‌های منفرد تقویت‌های بزرگ‌تری را در پاسخ‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد.

بیشتر مطالعات انجام شده بر روی عوارض توپوگرافی متمرکز بر عوارض منفرد هستند در حالی که نگاه واقع‌بینانه به طبیعت نشان‌دهنده پیچیدگی‌های بیشتری در عوارض سطحی می‌باشد. در همین راستا هدف این پژوهش بررسی اثر هم‌جواری تپه‌های نیم‌سینوسی همگن بر پاسخ لرزه‌ای می‌باشد. دلیل انتخاب عوارض نیم‌سینوسی این است که متداول‌ترین شکل عوارض



شکل (۱): نمای شماتیک و هندسه تپه‌های مجاور در مدل‌های M1، M3 و M5 تحت موج مهاجم  $S_v$  و محل قرارگیری ایستگاه‌های S1-S3 در هر مدل.

دینامیکی محیط است. معادله دیفرانسیل حاکم بر تعادل دینامیکی محیط‌های الاستیک خطی همسان و همگن، توسط رابطه (۱) بیان می‌گردد:

$$(c_L^2 - c_T^2) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + c_T^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + b_i = \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1)$$

که در آن  $u_i$  بیانگر تغییر مکان و  $b_i$  بیانگر نیروی پیکری محیط است.  $c_L$  و  $c_T$  سرعت‌های امواج طولی و عرضی محیط را نشان می‌دهند که به ترتیب از روابط  $c_L^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$  و  $c_T^2 = \mu/\rho$  به دست می‌آیند.  $\lambda$  و  $\mu$  ضرایب لامه و  $\rho$  دانسیته جرمی محیط هستند. معادله انتگرال مرزی حاکم بر محیط‌های الاستیک خطی همسان و همگن، با اعمال روش باقیمانده‌های وزنی بر معادله (۱) مطابق زیر به دست می‌آید.

$$c_{ij}(\xi) u_j(\xi, t) = \int_{\Gamma} \{u_{ij}^*(x, \xi, t) * p_j(x, t)\} d\Gamma - \int_{\Gamma} \{p_{ij}^*(x, \xi, t) * u_j(x, t)\} d\Gamma \quad (2)$$

که در آن  $p_i$  ترکشن بر روی سطح مماس بر مرز  $\Gamma$  را بیان می‌دارد.  $u_{ij}^*$  و  $p_{ij}^*$  جواب‌های اساسی معادله دیفرانسیل تعادل دینامیکی و به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های  $z$  ام جابه‌جایی و ترکشن نقطه  $x$  در لحظه  $t$  هستند که به واسطه اعمال یک بار متمرکز واحد موازی محور  $i$ ، در نقطه  $\xi$  و در لحظه  $t \leq \tau$  پدید آمده‌اند. عبارات  $p_j * u_{ij}^*$  و  $u_j * p_{ij}^*$  انتگرال‌های کانولوشن ریمن هستند.  $c_{ij}(\xi)$  در رابطه (۲) ضریب شناخته‌شده ناپیوستگی در نقطه  $\xi$  است که از تکنیک جواب اساسی  $p_{ij}^*$  ناشی می‌شود. این ضریب تنها تابع هندسه مرز بوده و در هر دو بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مقدار یکسانی دارد. در صورتی که محیط مورد بررسی در معرض هجوم امواج لرزه‌ای قرار گیرد، معادله انتگرال مرزی حاکم به شرح زیر اصلاح می‌شود:

$$c_{ij}(\xi) u_j(\xi, t) = \int_{\Gamma} \{u_{ij}^*(x, \xi, t) * p_j(x, t)\} d\Gamma - \int_{\Gamma} \{p_{ij}^*(x, \xi, t) * u_j(x, t)\} d\Gamma + u_i^{inc}(\xi, t) \quad (3)$$

که در آن  $u_i^{inc}$  تغییر مکان حاصله از موج مهاجم را بیان می‌دارد. برای حل مسئله به روش عددی می‌بایست معادله انتگرال مرزی به گونه‌ای بیان شود که مجموعه‌ای از معادلات خطی حاصل

بسیاری از این مطالعات به بررسی پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی اختصاص دارد (Babaadam et al., 2022; Behavior et al., 2007; Geli et al., 1988; Panji & Habibivand, 2020) که نشان می‌دهد این شکل از تپه‌ها یکی از رایج‌ترین اشکال تپه‌ها در طبیعت است. به همین منظور در این تحقیق نیز پنج تپه نیم‌سینوسی همگن مطابق شکل (۱) در کنار هم در نظر گرفته شده است. تپه‌ها در سه مدل M1، M3 و M5 که به ترتیب شامل ۱، ۳ و ۵ تپه هستند مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پاسخ لرزه‌ای برای ایستگاه رأسی در تپه میانی و ایستگاه‌های پاشنه در سه مدل مقایسه شده است محل قرارگیری ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.

تپه‌های نیم‌سینوسی با نسبت شکل (۱)، ارتفاع ۵۰۰ متر و نیم‌پهنای ۵۰۰ تحت موج قائم و مایل Sv با فرکانس غالب ۱ هرتز قرار گرفته‌اند. سرعت موج برشی در مدل ۱۰۰۰ متر بر ثانیه، مدول بالک ۵۸۶۷۶۴۸ کیلو پاسکال، مدول یانگ ۵۹۸۵۰۰۰ کیلو پاسکال و نسبت پواسون ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است.

به منظور انجام مدل‌سازی‌های عددی از روش اجزای مرزی و برنامه هیبرید (Kamalian, 2001) استفاده شده است که از میان روش‌های عددی موجود، دقت بسیار بالایی را در مدل‌سازی پراکنش امواج لرزه‌ای نشان داده است. از مهم‌ترین مزایای روش اجزای مرزی، برآورده نمودن شرط تشعشع سامرفلد (تشعشع موج از محیط به سمت بی‌نهایت و عدم انتشار امواج از بی‌نهایت به سمت محیط مورد بررسی) است. همچنین در روش اجزای مرزی، به دلیل کاهش یک بعد از معادلات، امکان استفاده از مش‌بندی‌های محدودتر فراهم می‌گردد که این امر سبب افزایش دقت و سرعت انجام محاسبات می‌شود. در روش اجزای مرزی، به دلیل انجام تحلیل‌ها در مرزهای محدوده مورد بررسی، امکان انتشار امواج کاذب در مش‌بندی دامنه‌ای نیز کاهش می‌یابد. مجموعه این شرایط تحلیل دقیق‌تر گسترش موج در محیط‌های بی‌نهایت را فراهم می‌سازد.

روش اجزای مرزی مبتنی بر معادله انتگرال مرزی تعادل

$$f(t) = \left[ 1 - 2 \cdot (\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2 \cdot e^{-(\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2} \right] \quad (4)$$

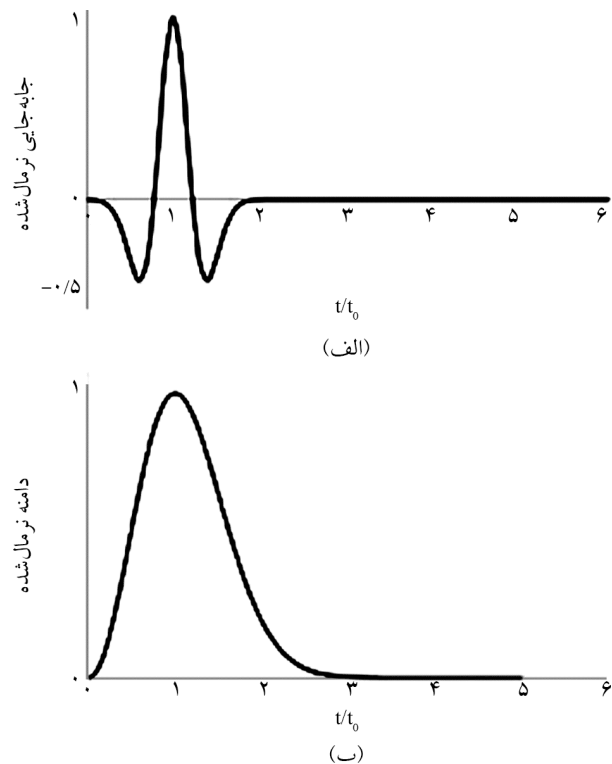
در رابطه (۴)،  $f_p$  و  $t_0$  به ترتیب فرکانس غالب و پارامتر زمان تأخیر است. در موج SV،  $f(t)$  مؤلفه افقی موج مهاجم را تعیین می‌کند، درحالی‌که مؤلفه عمودی صفر است. به‌منظور آماده‌سازی موج ریکر برای مدل‌سازی‌های عددی پارامتر time shift ( $t_0$ ) برابر ۱ و time step ( $\Delta t$ ) برابر ۰/۱ (با توجه به فرکانس ۱ هرتز) برای هر دو موج قائم و مایل در نظر گرفته شده‌اند. نتایج مدل‌سازی‌های عددی در حوزه زمان به دست آمده است که با اعمال سری فوریه در حوزه فرکانس قابل بررسی هستند. نمودارها به دو صورت کلی برای کل محدوده مورد مطالعه و یا به‌صورت نقطه‌ای برای ایستگاه (گره) مورد نظر ارائه شده است.

نمودارهای حوزه زمان کلی، نمودارهای سه‌بعدی می‌باشند که با استفاده از آنها زمان رسیدن موج (محور قائم) در هر نقطه (محور افقی) قابل مشاهده است و با استفاده از محور سوم نمودار که در قالب ستون رنگی ارائه شده است می‌توان دامنه موج را در هر نقطه به دست آورد (شکل ۳-الف). هدف از نمایش نمودارهای حوزه زمان کلی به دست آوردن الگوی انتشار موج در محدوده مورد مطالعه و بررسی اندرکنش امواج بازتاب شده ناشی از توپوگرافی سطحی است. در نمودار زمان-دامنه که برای یک گره ارائه شده است (شکل ۳-ب) تاریخچه زمانی موج در آن گره نشان داده شده است. در نمودارهای حوزه زمان، زمان به‌صورت بدون بعد ( $t_c/2b$ ) نشان داده شده است که در آن  $c_2$  سرعت موج برشی و  $b$  نیم‌پهنای تپه می‌باشد.

با اعمال سری فوریه بر نتایج حوزه زمان و تبدیل آنها به حوزه فرکانس، نمودارهای حوزه فرکانس کلی ایجاد می‌شوند (شکل ۳-پ). در این سری از نمودارها محتوای فرکانسی موج دریافت شده در محدوده مورد نظر قابل مطالعه است. این نمودارها نیز مشابه نمودارهای حوزه زمان به‌صورت سه‌بعدی (شکل ۳-پ) برای کل محدوده و یا به‌صورت دوبعدی (شکل ۳-ت) برای هر یک از گره‌ها ارائه می‌شوند که دو محور قائم و افقی فرکانس بدون بعد به‌دست آمده در هر نقطه از

گردیده و با حل آنها جواب مسئله مقدار مرزی به دست می‌آید. به‌منظور تبدیل معادله انتگرالی حاکم به شکل مطلوب، ابتدا در زمان و سپس در مکان جداسازی می‌شود. نهایتاً معادلات به‌دست آمده به شکل ماتریسی بیان خواهند شد. معادلات ذکر شده و عددی سازی آن در کد HYBRID به انجام رسیده و جزئیات آن در مراجع (Kamalian, 2001; Kamalian et al., 2006; Kamalian, Jafari, et al., 2003) بیان شده است.

به‌منظور آماده‌سازی مدل‌های HYBRID برای مدل‌سازی‌های عددی از المان‌های خطی سه‌گره‌ای استفاده شده است. تمام مدل‌های تحلیل شده توسط HYBRID به‌صورت همگن در نظر گرفته شده‌اند. در خصوص انتخاب ابعاد بهینه المان در روش اجزای مرزی مطالعه جامعی توسط مقامی و همکاران (Maghami et al., 2023) انجام شده است که در این پژوهش نیز انتخاب ابعاد المان‌ها بر اساس مطالعه صورت گرفته، انجام شده است. در این پژوهش موج ریاضیاتی ریکر با فرکانس ۱ هرتز (شکل ۲) مورد استفاده قرار گرفته است؛ که دامنه آن در حوزه زمان به وسیله رابطه (۴) محاسبه می‌شود:



شکل (۲): (الف) تاریخچه زمانی و (ب) طیف دامنه فوریه موج مهاجم ریکر.

بالای تپه‌ها (رأسی) و ایستگاه‌های S2 و S3 در هر سه مدل M1، M3 و M5 در پایین تپه‌ها قرار دارند (شکل ۱).

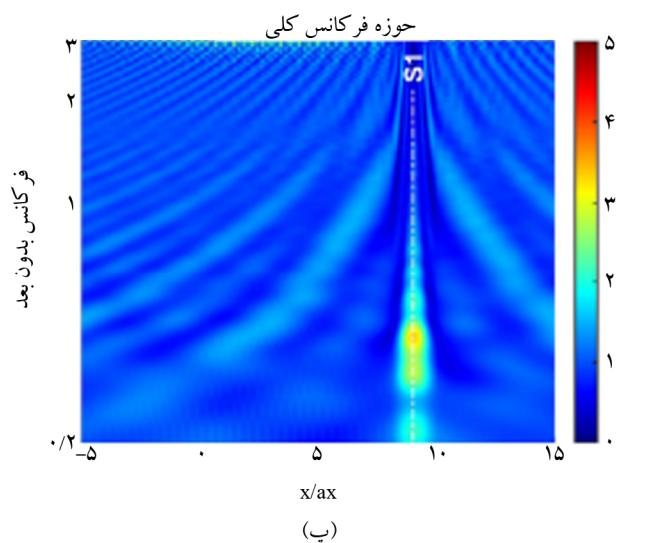
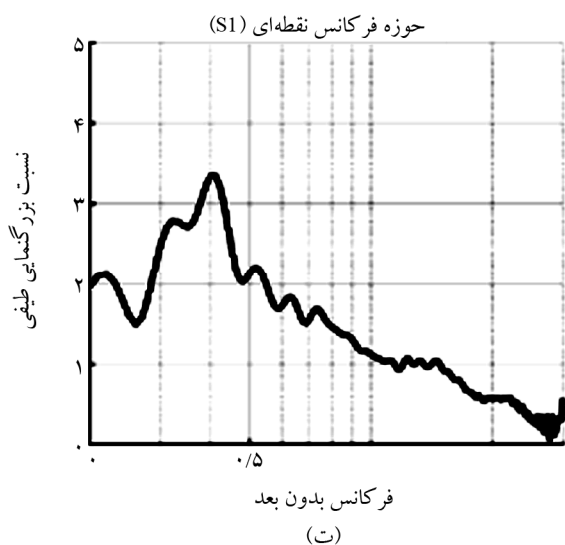
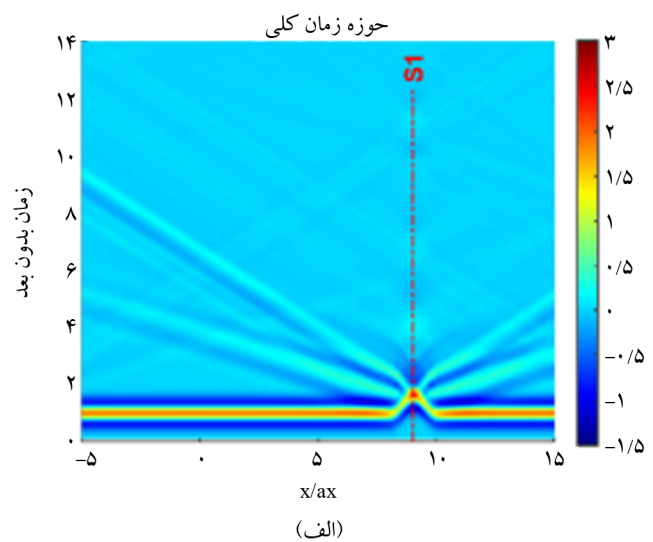
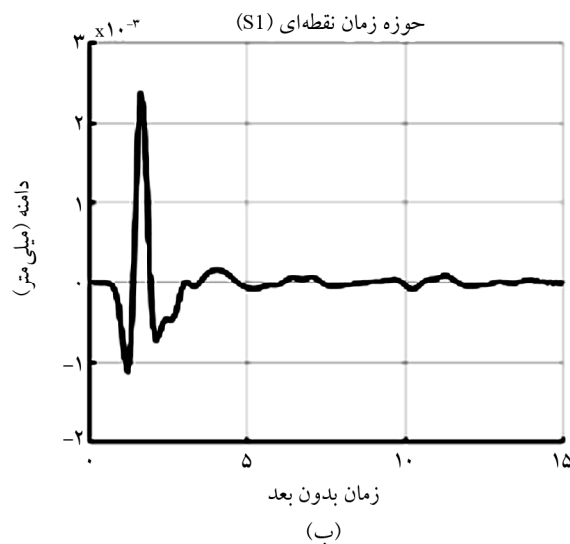
### ۳-۱- بررسی پاسخ لرزه‌ای در ایستگاه‌های بالای تپه

در این بخش پاسخ لرزه‌ای در ایستگاه S1 در هر سه مدل M1، M3 و M5 مورد مطالعه قرار گرفته است. به همین منظور نمودارهای حوزه زمان و حوزه فرکانس کلی و نقطه‌ای برای ایستگاه‌های رأسی در شکل (۴) ارائه شده است. الگوی انتشار موج در کل مدل و تاریخچه زمانی برای ایستگاه‌های رأسی به ترتیب در شکل A-4 و B-4 برای سه مدل M1، M3 و M5 در محدوده زمان بدون بعد ۰ تا ۱۴ نشان داده شده است.

محدوده را نمایش می‌دهد و در محور سوم بزرگنمایی نسبی یا عبارت دیگر نسبت بزرگنمایی در هر گره به نسبت بزرگنمایی سطح آزاد ارائه شده که طیفی رنگی در این نمودارها بیانگر بزرگنمایی نسبی است. در نمودارهای حوزه فرکانس نیز از فرکانس بدون بعد  $(\Omega = \omega b / \pi c_2)$  برای نمایش فرکانس استفاده شده است که در آن  $\omega$  به فرکانس زاویه‌ای اشاره دارد.

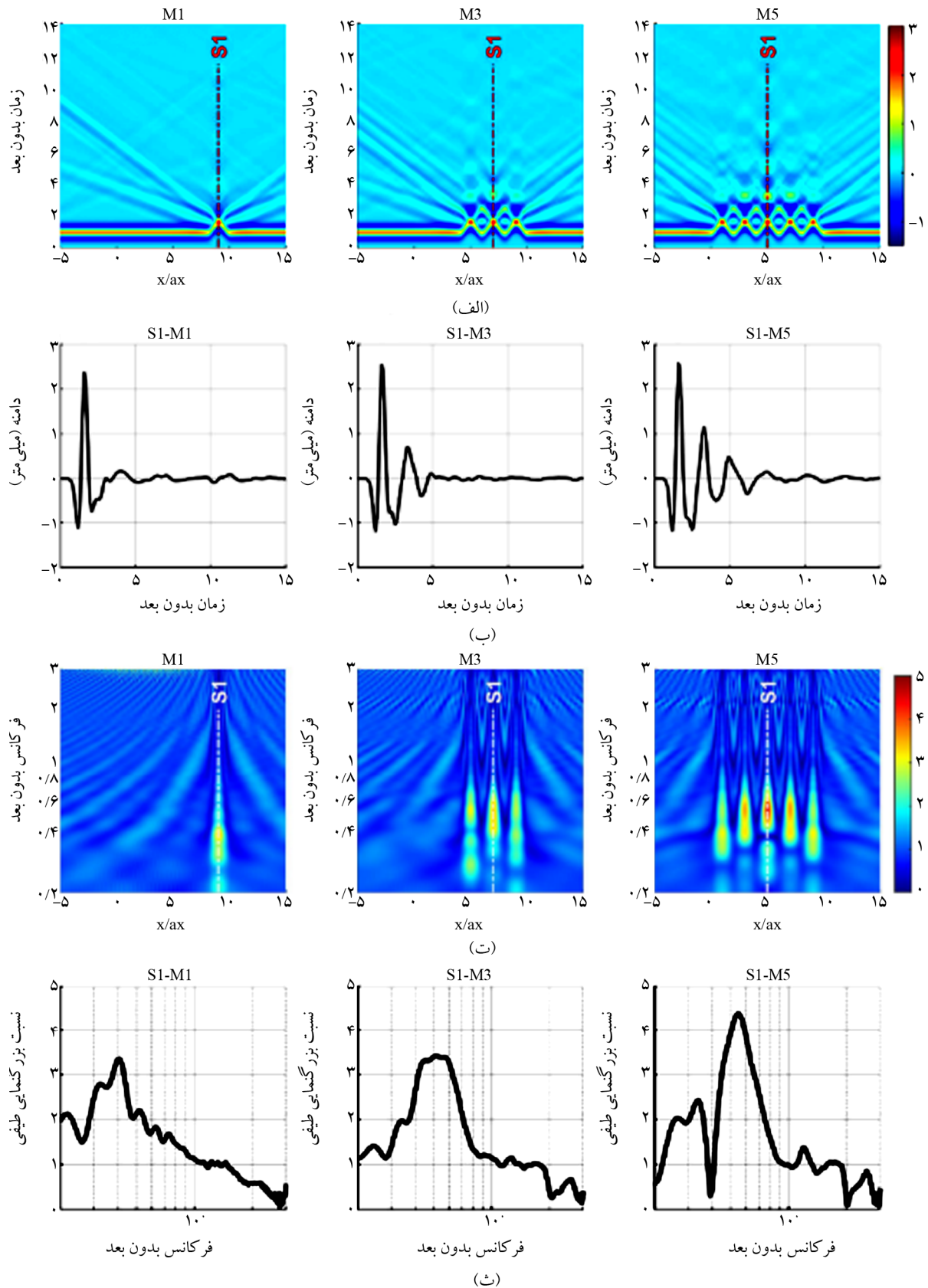
### ۳-۲ پاسخ لرزه‌ای عوارض هم‌جوار

پاسخ‌های لرزه‌ای برای دو گروه از ایستگاه‌های رأسی و ایستگاه‌های قرار گرفته در پایین تپه مورد مطالعه قرار گرفته است که از این میان سه ایستگاه S1-M1، S1-M3 و S1-M5 در

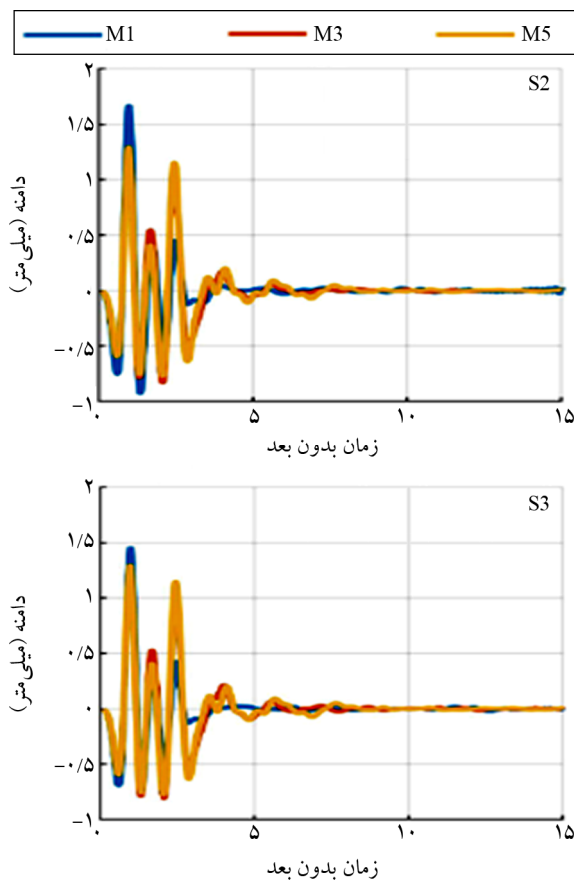


شکل (۳): (الف) نمودارهای حوزه زمان کلی، (ب) حوزه زمان نقطه‌ای، (پ) حوزه فرکانس کلی و (ت) حوزه فرکانس نقطه‌ای.





شکل (۴): (الف) الگوی انتشار موج در حوزه زمان برای مدل‌های M1، M3 و M5، (ب) تاریخچه زمانی ایستگاه‌های S1-M1، S1-M3 و S1-M5، (پ) پاسخ لرزه‌ای مدل‌های M1، M3 و M5 در محدوده فرکانس، در محدوده فرکانس بدون بعد ۰/۲ تا ۳ و (ت) بزرگنمایی طیفی برای سه ایستگاه S1-M1، S1-M3 و S1-M5.



شکل (۵): تاریخچه زمانی ایستگاه‌های S8، S10، S12 و S14 واقع در پایین تپه‌ها در بازه زمانی زمان بدون ۰ تا ۱۵.

مورد بررسی قرار گرفته است. برخلاف ایستگاه‌های رأسی که با اضافه شدن تپه‌های جدید یک پیک جدید نیز به پاسخ‌های حوزه زمان اضافه می‌شود، در اینجا تفاوت اصلی در حالت تک‌تپه‌ای (M1) و چند تپه‌ای (M3-M5) است که در محدوده زمانی ۲/۸ یک کوچک‌نمایی جدید به نمودار اضافه می‌شود.

در حالت کلی در هر دو نمودار سه پیک بزرگنمایی، به ترتیب در زمان‌های بدون بعد ۰/۹۵، ۱/۷ و ۲/۴ و کوچک‌نمایی در ۱/۳، ۲ و ۲/۸ دیده می‌شود.

در شکل (۶) پاسخ‌های حوزه فرکانس دو ایستگاه پاشنه‌ای S2 و S3 در قالب نمودارهای بزرگنمایی طیفی در مقابل فرکانس بدون بعد، در محدوده فرکانس بدون بعد ۰/۲ تا ۲ و برای ایستگاه‌های پایین تپه نشان داده شده است. نمودارهای نسبت طیفی برای ایستگاه‌های پایین تپه تناوبی از بزرگنمایی و کوچک‌نمایی است که به سمت فرکانس‌های بالاتر نوسانات

در مدل M1 پس از برخورد موج مهاجم به تپه، امواج بازنشر مجدد می‌یابند و به طرفین مدل گسترش می‌یابند و تنها یک پیک در زمان بدون بعد ۱/۶ دیده می‌شود (شکل ۴-ب)، در حالی که در دو مدل M3 و M5 با افزایش تعداد تپه‌ها پس از بازنشر موج، امواج به سمت مرکز مدل (تپه میانی) همگرا می‌شوند که نتیجه آن ایجاد فازهای متأخر در زمان بدون بعد ۳/۳ و ۴/۹ به ترتیب در مدل‌های M3 و M5 است. به عبارت دیگر با اضافه شدن تپه‌ها در مدل یک پیک جدید (فاز متأخر) نیز به نمودارهای حوزه زمان نقطه‌ای برای ایستگاه میانی (S1-M3 و S1-M5) در مدل اضافه می‌شود (شکل ۴-ب).

در پاسخ‌های حوضه فرکانس نیز (شکل ۴-پ) به خوبی دیده می‌شود زمانی که تعداد تپه‌ها افزایش پیدا می‌کند، تپه میانی نسبت به تپه‌های مجاور نسبت بزرگنمایی طیفی بیشتری را نشان می‌دهد و افزایش مقدار نسبت بزرگنمایی با افزایش تعداد تپه‌ها رابطه مستقیم دارد. مقایسه بیشترین بزرگنمایی‌های به دست آمده از ایستگاه S1-M1، S1-M3 و S1-M5 در جدول (۱) نیز گواه بر این موضوع است و بیشترین مقدار بزرگنمایی از ایستگاه S1-M1 به S1-M5 افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد که به ترتیب برابر است با ۳/۳ و ۳/۴. بر اساس نمودارهای حوزه فرکانس نقطه‌ای (شکل ۴-ت) فرکانس پیک از S1-M1 به S1-M5 به سمت فرکانس‌های بالاتر میل می‌کند و از مقدار ۰/۴ در S1-M1 به ۰/۵۵ در S1-M5 تغییر می‌کند.

جدول (۱): بیشترین بزرگنمایی طیفی مربوط به ایستگاه‌های بالای تپه (S1) و برای مدل‌های M1، M3 و M5 با تعداد تپه‌های متفاوت.

ایستگاه/ بالای تپه		
S1-M5	S1-M3	S1-M1
۴/۳	۳/۴	۳/۳

### ۳-۲- بررسی پاسخ لرزه‌ای در ایستگاه‌های پایین تپه

پاسخ‌های لرزه‌ای در حوزه زمان برای ایستگاه‌های قرار گرفته در پایین تپه در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل تاریخچه زمانی دو ایستگاه S2 و S3 (شکل ۱) در سه مدل M1، M3 و M5 در نمودارهای دامنه (میلی‌متر) در مقابل زمان بدون بعد



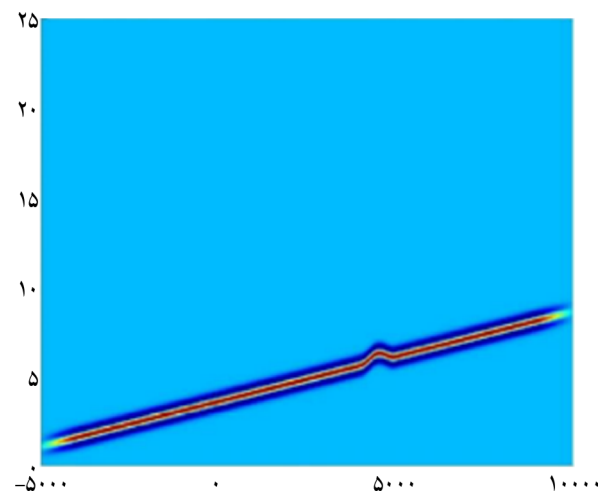
#### ۴- بررسی اثر زاویه موج مهاجم بر پاسخ لرزه‌ای

##### تپه‌های هم‌جوار

در این بخش اثر هم‌جواری بر پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی تحت موج مهاجم مایل مورد بحث قرار گرفته است. به منظور بررسی تأثیر زاویه موج مهاجم، پاسخ لرزه‌ای در دو مدل M1 و M5 در مقابل موج مهاجم S<sub>v</sub> از نوع ریکر با فرکانس غالب ۱ هرتز و دو حالت قائم و زاویه‌دار (زاویه ۳۰ درجه) مقایسه شده است. پاسخ‌های لرزه‌ای برای هر دو ایستگاه بالای تپه و پایین تپه به دست آمده است که در ادامه به‌طور کامل مورد بحث قرار گرفته است.

اعتبارسنجی کد هیبرید برای موج مهاجم مایل در یک مطالعه جداگانه‌ای توسط کامالیان و سهرابی بیدار (Kamalian & Sohrabi-Bidar, 2006) انجام شده است.

نمودار جابه‌جایی-زمان موج تولید شده در زاویه مایل در شکل (۷) نشان داده شده است. موج با زاویه ۳۰ درجه و از سمت چپ مدل وارد محیط می‌شود.



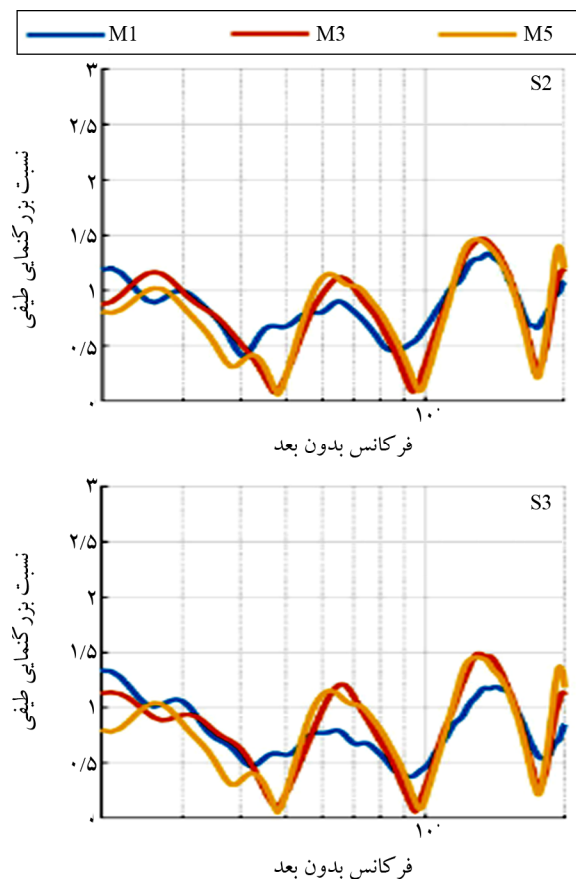
شکل (۷): نمودار جابه‌جایی-زمان انتشار موج مایل در نقاط گرهی.

در شکل (۸) پاسخ لرزه‌ای دو مدل M1 و M5 تحت دو موج مهاجم قائم (۸-الف و ۸-پ) و زاویه‌دار (۸-ب و ۸-ت) را در حوزه فرکانس به‌خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که پاسخ‌های لرزه‌ای به‌دست آمده نشان می‌دهد (شکل ۸) در مدل با موج مهاجم مایل نیز تپه میانی بیشترین نسبت بزرگنمایی طیفی را در مقایسه با تپه‌های مجاور و همچنین با تپه تکی نشان می‌دهد.

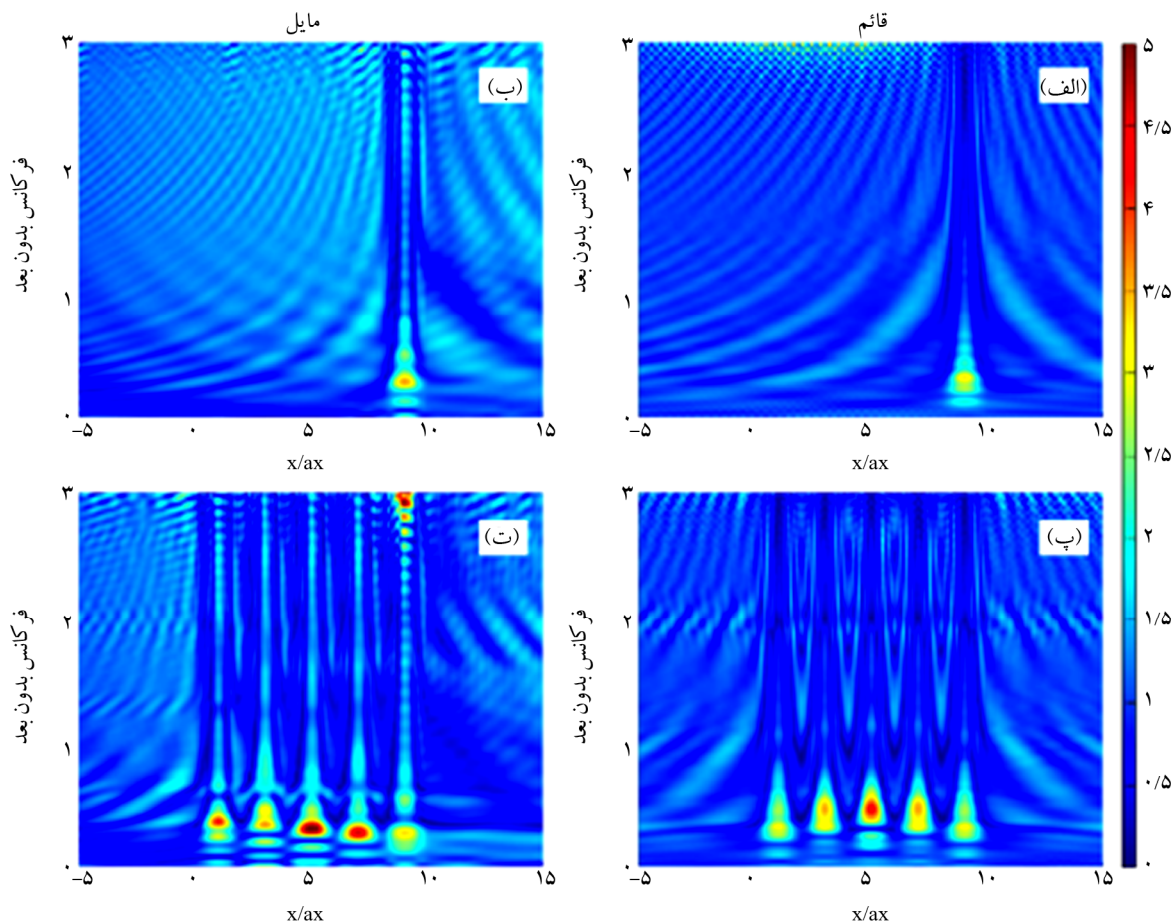
بیشتر می‌شود.

اثر هم‌جواری بر پاسخ لرزه‌ای به‌صورت تشدید در بزرگنمایی و کوچک‌نمایی‌ها دیده می‌شود، نکته قابل توجهی که در پاسخ‌های حوزه فرکانس دیده می‌شود این است که دو مدل M3 و M5 به‌خصوص در فرکانس‌های بالای ۰/۵ هرتز نسبتاً بر هم منطبق هستند درحالی‌که هر دوی آنها اختلاف قابل توجهی را با نمودار M1 نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که هر دو سمت تپه پاسخ‌های یکسانی را ارائه می‌دهند و محدوده‌های فرکانسی در هر دو ایستگاه مشابه است.

همچنین در دو ایستگاه S2 و S3 شیفت فرکانسی محسوسی نیز دیده می‌شود، به‌عبارت‌دیگر نمودار M1 در دو فرکانس بدون بعد ۰/۴ و ۰/۸ کوچک‌نمایی نشان می‌دهد که برای دو نمودار M3 و M5 به ترتیب در فرکانس‌های بدون بعد ۰/۴۸ و ۰/۹۵ دیده می‌شود.



شکل (۶): بزرگنمایی طیفی ایستگاه‌های S2 و S3 واقع در پایین تپه‌ها در مدل‌های M1، M3 و M5 در محدوده فرکانس بدون بعد ۰/۲ تا ۰/۲.



شکل (۸): نسبت بزرگنمایی طیفی مدل‌ها تحت موج مهاجم با زاویه قائم در حالت تک‌تپه‌ای (الف) و پنج‌تپه‌ای (ب) و تحت موج مهاجم مایل با زاویه ۳۰ درجه برای هر دو حالت تک‌تپه‌ای (ب) و پنج‌تپه‌ای (ت).

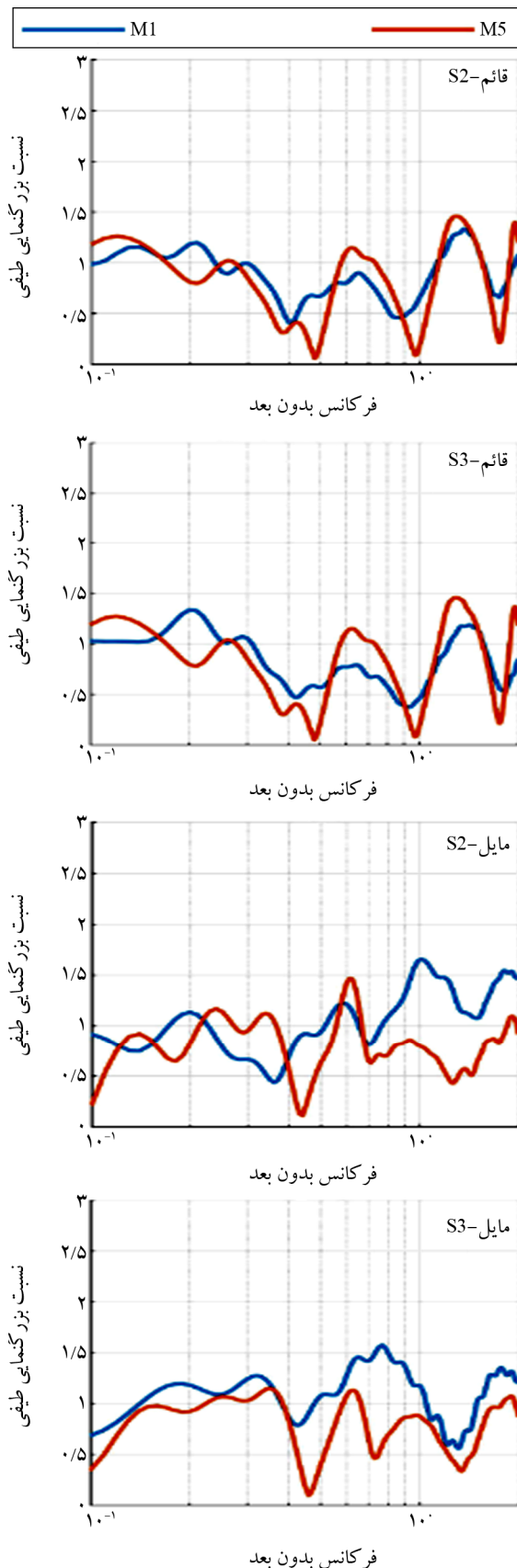
مقایسه بیشترین نسبت بزرگنمایی طیفی به دست آمده برای S1-M5 تحت موج مهاجم قائم و مایل با زاویه ۳۰ درجه نشان می‌دهد که زمانی که موج مهاجم به صورت مایل به مدل وارد می‌شود بزرگنمایی به دست آمده در H3 حدود ۱/۲ بار بیشتر از بزرگنمایی طیفی به دست آمده تحت موج قائم است (شکل ۹). همچنین مقایسه نمودارهای نسبت بزرگنمایی طیفی برای ایستگاه S1 تحت موج مهاجم قائم و دارای زاویه ۳۰ درجه در شکل (۹) نشان می‌دهد که در حالت قائم، پیک فرکانسی از ۰/۴ برای S1-M1 به ۰/۵۵ در S1-M5 افزایش می‌یابد در حالی که مقدار شیفت فرکانسی در مدل‌ها تحت موج قائم بسیار کمتر بوده و مقدار آن از ۰/۳۵ در S1-M1 به ۰/۴ در S1-M5 تغییر می‌کند.

مقایسه‌ی بیشترین نسبت بزرگنمایی طیفی به دست آمده برای تپه تکی و تپه میانی (در حالت M5) نشان می‌دهد که افزایش

همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود مقادیر به دست آمده برای هر دو ایستگاه S1-M5 و S1-M1 در معرض موج مهاجم مایل بیشتر از موج قائم است. زاویه موج مایل در این پژوهش ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است. از آنجایی که موج مهاجم از نوع Sv بوده پس از برخورد به سطح زمین به صورت دو موج P و Sv منتشر می‌شود که بر طبق قانون اسنل، موج P با زاویه ۹۰ درجه (افقی) بازتاب می‌شود که دارای حداکثر میزان انرژی است؛ و به همین دلیل نمودارهای نسبت طیفی برای ایستگاه‌های رأسی S1-M1 و S1-M5 تحت زاویه ۳۰ درجه مقدار بیشتری را نشان می‌دهند.

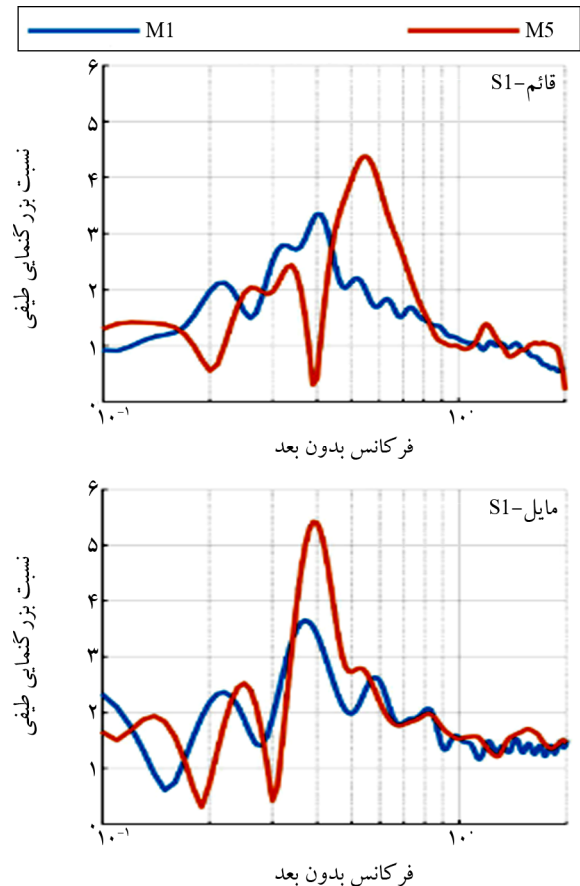
جدول (۲): بیشترین نسبت بزرگنمایی طیفی ایستگاه S1 تحت موج مهاجم قائم و مایل برای دو مدل تک‌تپه‌ای و پنج‌تپه‌ای.

قائم		مایل (زاویه ۳۰ درجه)	
S1-M1	S1-M5	S1-M1	S1-M5
۳/۳	۴/۳	۳/۶	۵/۴



شکل (۱۰): بزرگنمایی طیفی دو ایستگاه پاشنه‌ای S1 و S3 برای دو مدل M1, M5 تحت موج مهاجم قائم و مایل با زاویه ۳۰ درجه.

بزرگنمایی طیفی ناشی از هم‌جواری در حالت قائم برابر با ۳۰ درصد (از ۳/۳ به ۴/۳) است درحالی‌که مقدار آن در حالت مایل (زاویه ۳۰ درجه) به ۵۰ درصد (از ۳/۶ به ۵/۴) افزایش می‌یابد که قابل توجه است. در اینجا می‌توان دید که اثر هم‌جواری در زاویه ۳۰ درجه تشدید می‌شود.



شکل (۹): مقایسه بزرگنمایی طیفی ایستگاه S1 واقع بر تاج تپه برای دو مدل M5 و M1 تحت موج مهاجم قائم و مایل.

در ادامه اشاره‌ای شده است به پاسخ لرزه‌ای در ایستگاه‌های پایین تپه که در شکل (۱۰) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند زمانی که مدل در معرض موج مهاجم قائم قرار می‌گیرد با افزایش تعداد تپه‌ها تا فرکانس بدون بعد ۰/۴ بزرگنمایی طیفی کاهش می‌یابد و بعد از آن شاهد تشدید مقادیر بزرگنمایی و کوچک‌نمایی در مدل M5 هستیم و این روند برای هر دو سوی تپه (ایستگاه S2 و S3) مشابه است. در مقابل زمانی که مدل‌ها تحت موج مهاجم با زاویه ۳۰ درجه قرار می‌گیرند رفتار دو

بزرگنمایی در تاج تپه میانی افزایش می‌یابد.

- در ایستگاه‌های پایین تپه نیز هم‌جواری به‌صورت تشدید در مقادیر بزرگنمایی و کوچک‌نمایی دیده می‌شود.

- نتایج مقایسه‌ی نمودارهای نسبت بزرگنمایی طیفی دو حالت M1 و M5 تحت امواج مهاجم قائم و مایل با زاویه ۳۰ درجه نشان می‌دهد که زاویه موج مهاجم بر «اثر هم‌جواری» تأثیر گذار است و سبب تشدید در نسبت‌های بزرگنمایی طیفی می‌شود.

- نتایج مربوط به ایستگاه S1 در هر دو مدل تحت موج مهاجم مایل و قائم نشان می‌دهد که شیفت فرکانسی در پیک نمودارهای نسبت بزرگنمایی تحت موج مهاجم مایل با زاویه ۳۰ درجه کاهش می‌یابد.

- از آنجایی که در حال حاضر به دلیل رشد جمعیت و بزرگ شدن شهرها، شهرک‌سازی در اطراف شهرها به‌ویژه در مناطق کوهستانی اطراف شهرها (به‌عنوان مثال شهر پردیس در استان تهران) افزایش یافته است، لزوم توجه به اثر هم‌جواری و اثر آن بر پاسخ لرزه‌ای چه بر تاج تپه‌ها و چه در پاشنه در طراحی ساختمان‌ها بسیار حائز اهمیت است. همان‌طور که نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهند تاج تپه‌ها در حالت هم‌جواری نسبت بزرگنمایی قابل توجه بیشتری را نسبت به تپه تکی نشان می‌دهد. این در حالی است که در آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان تنها اشاره مختصری به اثر توپوگرافی در عوارض منفرد شده است.

در انتها باید به این موضوع اشاره شود که تمام مدل‌سازی‌های عددی در این پژوهش با استفاده از کد HYBRID انجام شده است که برای بررسی رفتار لرزه‌ای مواد دارای رفتار خطی و هندسه‌های ساده طراحی شده است لذا پیشنهاد می‌شود که بررسی اثر هم‌جواری با استفاده از برنامه‌های دیگر و برای محیط‌هایی دارای رفتار غیر خطی و هندسه‌های دارای پیچیدگی (ناهمگن) نیز مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این بررسی موج مهاجم مایل نیز در این پژوهش تنها در یک زاویه، ۳۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان برای ارائه نتایج جامع‌تر، در مطالعات آتی به بررسی پاسخ لرزه‌ای در زوایای دیگر موج مهاجم نیز پرداخته شود.

سوی تپه متفاوت است. در ایستگاه S3 در تمام محدوده فرکانسی مدل M5 مقادیر نسب بزرگنمایی کمتری را نسبت به مدل M1 نشان می‌دهد در حالی که ایستگاه S2 رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد. در این ایستگاه تا فرکانس بدون بعد ۰/۷، نمودار M5 مقایسه با نمودار M1 تشدید در بزرگنمایی و کوچک‌نمایی همراه با شیفت فرکانسی به سمت فرکانس‌های بالاتر را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال کوچک‌نمایی نمودار M1 در فرکانس بدون بعد ۰/۳۵ در نمودار M5 به سمت فرکانس بدون بعد ۰/۴۵ حرکت می‌کند و مقدار بزرگنمایی نسبی آن نیز از ۰/۴ به ۰/۱ کاهش می‌یابد که نشان دهنده تشدید در مقدار کوچک‌نمایی است. از طرف دیگر از فرکانس بدون بعد ۰/۷ به سمت فرکانس‌های بالاتر نمودار M5 با اختلاف زیادی مقادیر نسبت بزرگنمایی کمتری را نسبت به نمودار M1 نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی هم‌جوار مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور بررسی اثر هم‌جواری از سه مدل M1، M3 و M5 با تعداد تپه‌های متفاوت استفاده شده است. مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از موج ریاضیاتی ریکر و فرکانس غالب ۱ هرتز و در دو حالت قائم و مایل با زاویه ۳۰ درجه انجام شده است. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش به‌طور مختصر در ادامه بیان شده است:

- با افزایش تعداد تپه‌ها، موج مهاجم پس از برخورد به عوارض مجدد در محیط منتشر می‌شود که بر طبق نتایج حوزه زمان ارائه شده، در اثر برخورد موج به تپه‌های مجاور و گسترش مجدد، در ایستگاه‌های S1 پیک جدیدی ظاهر می‌شود و در نمودارهای حوزه فرکانس نیز به‌صورت افزایش مقدار نسبت بزرگنمایی طیفی همراه با شیفت فرکانسی (به سمت فرکانس‌های بالاتر) دیده می‌شود.

- بیشترین مقدار بزرگنمایی طیفی در ایستگاه S1-M5 واقع بر تاج تپه میانی در مدل M5 به دست آمده است که نشان می‌دهد با افزایش تعداد تپه‌ها از یکی به پنج تا مقدار

Study of the effect of geometry on the seismic behavior of symmetric and asymmetric two-dimensional semi-sine topographic features. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 9(3), 19-35. doi: 10.48303/BESE.2021.244471.

Babaadam, N., Uromeihy, A., Sohrabi-Bidar, A., Haghshenas, E., & Maghami, S. (2021). Seismic response of symmetric and asymmetric two-dimensional semi-sine topographic features against vertical incident SV waves. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 9(3), 19-35.

Behavior, S., Hills, S. S., Propagating, V., & Waves, I. (2007). Seismic Behavior of 2D Semi-Sine Shaped Hills Against Vertically Propagating Incident Waves. *Esteghlal*, 26(1), 109-130.

Bouckovalas, G.D., & Papadimitriou, A.G. (2005). Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. doi: 10.1016/j.soildyn.2004.11.008.

Bourdeau, C., & Havenith, H. (2008). Site effects modelling applied to the slope affected by the Suusamyrdarya earthquake (Kyrgyzstan, 1992). *Engineering Geology*, 97(3-4), 126-145. doi: 10.1016/j.enggeo.2007.12.009.

Fichtner, A. (2014). Effects of surface geology on seismic motion. *Geophysical Journal International*, 197(2002), 1527-1531. Retrieved from [http://esg4.eri.ucsb.edu/sites/esg4.eri.ucsb.edu/files/2.4\\_Malvick\\_et\\_al.pdf](http://esg4.eri.ucsb.edu/sites/esg4.eri.ucsb.edu/files/2.4_Malvick_et_al.pdf).

Geli, L., Bard, P., & Jullien, B. (1988). The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results. *Bulletin of the Seismological Society of America*. doi: 10.1016/0148-9062(88)90024-1.

Géli, L., Bard, P. Y., & Julien, B. (1988). The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1) 42-63. doi: 10.1016/0148-9062(88)90024-1.

Janku, L., Villeneuve, M., Massey, C., & Kaiser, A. (2016). Numerical modelling of seismic site effects and their impact on slope stability in Wellington, New Zealand. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, 2(September 2022), 1153-1157. doi: 10.1201/b21520-139.

## مراجع

Afzalirad, M., Naghizadehrokn, M., & Khosravi, I. (2019). Dynamic behavior of double and triple adjacent 2D hills using boundary element method. *Heliyon*, 5(1), e01114. doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e01114.

Alielahi, H., & Adampira, M. (2016). Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: Amplification patterns and engineering applications. *International Journal of Civil Engineering*, 14(4), 233-251. doi: 10.1007/s40999-016-0020-7.

Alielahi, H., & Adampira, M. (2018). Evaluation of 2D seismic site response due to hill-cavity interaction using boundary element technique. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(6), 1137-1167. doi: 10.1080/13632469.2016.1277437.

Alielahi, H., Kamalian, M., & Adampira, M. (2016). A BEM investigation on the influence of underground cavities on the seismic response of canyons. *Acta Geotechnica*, 11(2), 391-413. doi: 10.1007/s11440-015-0387-7.

Amelsakhi, M., Sohrabi-Bidar, A., & Shareghi, A. (2014). *Spectral Assessing of Topographic Effects on Seismic Behavior of Trapezoidal Hill*. 8(4), 245-252.

Anggraeni, D. (2010). Modelling the impact of topography on seismic amplification at regional scale. *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, Thesis for the Degree of Master of Science in Geo- Information Science and Earth Observation, The Netherlands*.

Ba, Z., Fu, J., Liu, Y., Lee, V. W., & Wang, Y. (2021). Scattering of elastic spherical P, SV, and SH waves by three-dimensional hill in a layered half-space. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. doi: 10.1016/j.soildyn.2020.106545.

Babaadam, N., Uromeihy, A., Havenith, H.-B., Sohrabi-Bidar, A., & Maghami, S. (2023). The evaluation of the adjacency effect on the seismic response of homogenous hills. *Journal of Seismology*, 27(3), 505-525. doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10145-9>.

Babaadam, N., Uromeihy, A., Sohrabi-bidar, A., Haghshenas, E., & Maghami, S. (2022). Numerical



- sites in Tehran and comparison with 2D and 3D numerical modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(5-6).
- Kumar, V., Kumar, L., Narayan, J. P., & Kumar, N. (2018). A study of effects of multi-ridge on the ground motion amplification. *16<sup>th</sup> Symposium on Earthquake Engineering*, 162.
- Lee, S.J., Komatitsch, D., Huang, B.S., & Tromp, J. (2009). Effects of topography on seismic-wave propagation: An example from Northern Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, doi: 10.1785/0120080020.
- Maghami, S., Sohrabi-Bidar, A., & Babaadam, N. (2023). Evaluation of the stability of time domain boundary element method in seismic analysis of heterogeneous environments (In Persian). *Journal of Computational Methods In Engineering*, 41(2), 61-82. doi: 10.47176/jcme.40.1.3741DOI.
- Maghami, S., Sohrabi-Bidar, A., & Babaadam, N. (2022). Seismic response analysis of Qom sedimentary basin using spectral element method in time and frequency domain. *Iranian Journal of Engineering Geology*, 15(1), 71-88.
- Maghami, S., Sohrabi-Bidar, A., Bignardi, S., Zarean, A., & Kamalian, M. (2021). Extracting the shear wave velocity structure of deep alluviums of "Qom" Basin (Iran) employing HVSR inversion of microtremor recordings. *Journal of Applied Geophysics*, 185, 104246. doi: 10.1016/j.jappgeo.2020.104246.
- Maghoul, P., Gatmiri, B., Systems, K.P., & Amini, D. (2015). *A Review of Seismic Site Amplification by Considering Geometrical and Geotechnical Characteristics of Sites*. September.
- Meunier, P., Hovius, N., & Haines, J.A. (2008). Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(3-4), 221-232. doi: 10.1016/j.epsl.2008.07.020.
- Mohamamdi, K., & Asimaki, D. (2015). *Topography Effects: From Infinite Wedges to Three-Dimensional Features*. November.
- Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J.A., & Jafari, M.K. (2014). Analysing seismic convex topographies by a half-plane time-domain BEM. *Geophysical Journal*
- Kamalian, M., Mohazzab, K., Sohrabi-Bidar, A., & Haghshenas, E. (2012). Seismic behavior of 2D Semi-sine Sh. aped hills against vertical SV waves. *Journal of Computational Methods in Engineering*, 31(1), 29-45.
- Kamalian, M. (2001). *Time Domain Two-Dimensional Hybrid FEM / BEM Dynamic Analysis of Non-Linear Saturated Porous Media*. Ph.D. Dissertation, Tehran University.
- Kamalian, M., Gatmiri, B., & Bidar, A.S. (2003). On time-domain two-dimensional site response analysis of topographic structures by BEM. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 5(2), 35-45.
- Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A., & Khalaj, A. (2006). Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 26(1), 807-827, doi: 10.1002/cnm.
- Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A., & Khalaj, A. (2007). Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, doi: 10.1002/cnm.933.
- Kamalian, M., Jafari, M.K., & Sohrabi-Bidar, A. (2007). Seismic Behavior of 2D Semi-Sine Shaped Hills Subjected To Vertically Propagating Incident Sv and P Waves. *Esteghlal*, 26(1).
- Kamalian, M., Jafari, M.K., & Sohrabi-Bidar, A. (2007). Seismic behavior of two-dimensional semi-sin hills adjacent vertical incident waves. *Computational Methods in Engineering*, 26(1), 109-130.
- Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., & Gatmiri, B. (2006). Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid BE/FE method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, doi: 10.1016/j.soildyn.2005.12.008.
- Kamalian, M., & Sohrabi-Bidar, A. (2006). Transient site response analysis of nonhomogeneous two-dimensional topographic features using BEM. *Esteghlal*, 24(2).
- Khandan, M., Haghshenas, E., & Kamalian, M. (2011). Experimental study of seismic behavior of two hilly



- Sohrabi-Bidar, A., & Kamalian, M. (2013). Effects of three-dimensionality on seismic response of Gaussian-shaped hills for simple incident pulses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 1-12, doi: 10.1016/j.soildyn.2013.04.009.
- International, 197(1), 591-607, doi: 10.1093/gji/ggu012.
- Panji, M., & Habibivand, M. (2020). Seismic analysis of semi-sine shaped alluvial hills above subsurface circular cavity. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19(4), 903-917, doi: 10.1007/S11803-020-0603-9.
- Panji, M., & Mojtazadeh-Hasanlouei, S. (2020). Transient response of irregular surface by periodically distributed semi-sine shaped valleys: incident s h waves. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 14(1). doi: 10.1142/S1793431120500050.
- Panji, M., & Mojtazadeh-Hasanlouei, S. (2021). Surface motion of alluvial valleys subjected to obliquely incident plane sh-wave propagation. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(12), 6352-6377, doi: 10.1080/13632469.2021.1927886.
- Panji, M., & Yasemi, F. (2017). Pattern of ground magnification in the presence of subsurface circular heterogeneity against invading SH waves. *Journal of Civil and Environmental Research*, 3(2).
- Razmkhah, A., Golrokh, R., & Kamalian, M. (2008). Evaluation of characteristic period corresponded seismic response of irregular topographic features. *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*.
- Razmkhah, A., Kamalian, M., & Alielahi, H. (2008). Seismic behavior of 2D topographic features subjected to vertically propagating incident sv at high frequencies. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, 40975(May), 1-12. doi: 10.1061/40975(318)169.
- Reinoso, E., Wrobel, L. C., & Power, H. (1996). *Three-Dimensional Scattering of Seismic Waves from Topographical Structures*.
- Sánchez-Sesma, F., & Campillo, M. (1991). Diffraction of P, SV, and Rayleigh waves by topographic features: A boundary integral formulation. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Sánchez-Sesma, F., Chávez-García, F., & Bravo, M.A. (1988). Seismic response of a class of alluvial valleys for incident SH waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1), 83-95.

## Numerical Modeling of the Adjacency Effect on the Seismic Response of Homogeneous Semi-Sine Hills

Niloufar Babaadam<sup>1\*</sup>, Ali Uromeihy<sup>1</sup>, Abdollah Sohrabi-Bidar<sup>3</sup>, Ebrahim Haghshenas<sup>4</sup> and Shahram Maghami<sup>5</sup>

1. Ph.D., Department of Engineering Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, \*Corresponding Author, email: niloufar.babaadam@gmail.com
2. Professor, Department of Engineering Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran,
3. Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
4. Associate Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
5. Ph.D., Campus Numerique in the Alps, Grenoble, France

Knowing the factors that increase or decrease the effects of seismic waves is one way to minimize the damage caused by earthquakes. In recent decades, many researchers have studied these factors, including one of the most important ones: topographic effects. The effect of surface features on ground motions, known as the topographic effect, has been studied using various methods that have emerged in the last few decades. Most studies on topographic features focus on single features, while nature shows more complexities in surface features. Therefore, this research aims to investigate the effect of the neighborhood of homogeneous semi-sine hills on seismic response. Semi-sine features are the most common form of topographic features in nature, making them important in the application of study results. The research uses the boundary element method and HYBRID code for 2D numerical modeling. In the first part, the seismic behavior of a semi-sine hill with a shape ratio of 1, height of 500 m, and half-width of 500 m is studied. Then, the number of hills is increased to five to investigate the effect of adjacency. The seismic behavior of the hills in three models M1, M3 and M5, and for two groups of stations located on the crest and foot-hill are compared with each other in the time and frequency domain. Finally, the impact of the angle of the incident wave on the adjacency effect and the seismic response of the adjacent features is investigated.

The following are the results obtained from this research:

As the number of hills increases, the incident wave propagates in the domain by re-reflecting from other features. According to the presented time domain results, the wave reflected in the adjacent hills generates a new peak in the S1 stations. In the frequency domain graphs, an increase in the value of the spectral amplification ratio is observed along with the frequency shift towards higher frequencies.

The crest of the middle hill in the M5 model, specifically the S1-M5 station, had the highest value of spectral amplification. This indicates that as the number of hills increased from one to five, the amount of amplification increased at the crest of the middle hill.

Adjacent hills also cause intensification in the amplification and de-amplification values at the bottom of the hill.

The comparison of the graphs of the spectral amplification ratio of the two models M1 and M5 under vertical and oblique incident waves with an angle of 30 degrees shows that the angle of the incident wave has an effect on the “adjacency effect” and causes an increase in the spectral amplification ratios.

The results for station S1 in both models under oblique and vertical incident waves indicate that the frequency shift in the peak of the spectral amplification graphs decreases under oblique incident waves with an angle of 30 degrees.

Due to the population growth and urban expansion, settlements around cities have increased, especially in mountainous areas around cities such as Pardis City in Tehran province. It is important to pay attention to the effect of adjacency and its impact on seismic response in the design of buildings, both on the crest and heel of hills. The results of this research show that the crest of hills in the adjacent state has a significantly higher spectral amplification ratio than a single hill. However, building codes only briefly reference the effect of topography.

**Keywords:** Topographic Effects, Adjacency Effects, Semi-Sine Hills, 2D Numerical Modeling, Boundary Element Method, HYBRID.